

Выведены математические выражения для моделирования коэффициентов участия потребителя и сетевого предприятия в нарушении симметрии по обратной последовательности.

УДК 621.311

П.Г. Щербакова

Харьковская национальная академия городского хозяйства

## МОДЕЛИРОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ УЧАСТИЯ СУБЪЕКТОВ В НАРУШЕНИИ СИММЕТРИИ ПО ОБРАТНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

Вопросы определения участия потребителей и сетевого предприятия в нарушении симметрии на сборных шинах представляют интерес как составная часть актуальной задачи повышения качества электрической энергии (КЭ). Этим вопросам уделено большое внимание в исследованиях, проводимых на кафедре электроснабжения городов ХНАГХ в рамках общей проблемы анализа текущих режимов электрической сети путем использования современных контрольно-измерительных технологий.

Разработан метод определения участия потребителей в нарушении симметрии [1], в котором для точки общего присоединения (ТОП), расположенной на сборных шинах подстанции (рис. 1), нагрузки представляют в виде фазных проводимостей. Затем

матрицы фазных проводимостей  $\bar{Y}_\phi$  переводят в систему координат симметричных составляющих  $\bar{Y}_s$ , для которой выведены формулы коэффициентов участия  $i$ -го потребителя в нарушении симметрии по нулевой последовательности

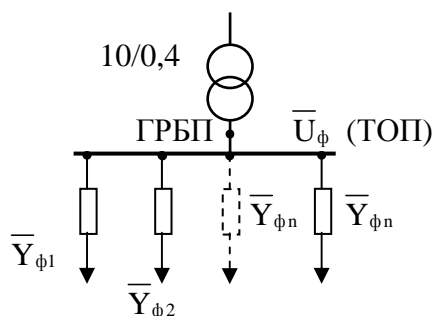


Рис. 1. Представление нагрузки сборных шин фазной проводимостью

$$K_{0\text{уч}i} = \frac{y_{0i}}{y_{0i} + \sum_{i=1}^n |y_{0\Sigma} - y_{0i}|} \quad (1)$$

и по обратной последовательности

$$K_{2\text{уч}i} = \frac{y_{2i}}{y_{2i} + \sum_{i=1}^n |y_{2\Sigma} - y_{2i}|} \quad (2)$$

Оценка участия по нулевой последовательности (1) является полной и может быть использована для распределения ответственности между потребителями в ТОП. Количественная оценка участия по обратной последовательности (2) произведена только между потребителями, так как не учитывает влияние электроснабжающей организации (системы). Для учета участия системы в создание несимметрии на границе раздела балансовой принадлежности (ГРБП) проведен анализ влияния потребителей на несимметрию по обратной последовательности [2]. Получены формулы, определяющие коэффициенты участия обобщенной нагрузки сборных шин  $K_{2\text{уч}n}$  и системы  $K_{2\text{уч} \text{сист}}$ :

$$K_{2\text{учн}} = \frac{K_{2U}''}{K_{2U}' + K_{2U}''}; \quad K_{2\text{учист}} = \frac{K_{2U}'}{K_{2U}' + K_{2U}''}. \quad (3)$$

В выражениях (3) использованы коэффициенты  $K_{2U}' = U_2' / U_1$  и  $K_{2U}'' = U_2'' / U_1$ , которые определяются на ГРБП соотношением напряжений обратной последовательности  $U_2'$  и  $U_2''$ , к напряжению прямой последовательности  $U_1$ . Значения  $U_2'$  и  $U_2''$  использованы в качестве меры воздействия системы и потребителя на несимметрию при расположении ГРБП на общем вводе (рис. 1). В статье показан физический смысл и обосновано применение этих величин, но не раскрыт механизм их получения, что делает предложенный метод определения коэффициентов участия не завершенным и не дает возможности его практического использования.

**Целью статьи** является оценка возможности и получение математических выражений для моделирования коэффициентов участия. Достижение поставленной цели обеспечит практическое применение метода определения участия потребителей и сетевого предприятия в нарушении симметрии по обратной последовательности.

Значения напряжений, используемых для расчета коэффициентов участия по формуле (3), отличается по способу и сложности их определения. Это определяется различием физического смысла, который заложен в понятия  $U_1$ ,  $U_2'$  и  $U_2''$ .

Напряжение прямой последовательности  $U_1$  есть результат преобразований фазных напряжений, измеренных на ГРБП. Такие же преобразования дают напряжение обратной последовательности  $U_2$ , необходимое для определения коэффициента несимметрии по обратной последовательности на ГРБП  $K_{2U} = U_2 / U_1$ . Можно считать, что значения  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $K_{2U}$  получают путем прямого измерения.

Значения  $U_2'$  и  $U_2''$  в общем случае носят абстрактный характер и не подлежат прямому измерению, хотя по времени оценки совпадают с моментом измерения  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $K_{2U}$ .  $U_2'$  – напряжение обратной последовательности, которое было бы зафиксировано на ГРБП по причине нарушения симметрии только системой при симметричной нагрузке.  $U_2''$  – напряжение обратной последовательности, которое было бы зафиксировано на ГРБП по причине нарушения симметрии только потребителем при симметричной системе. В статье [2] не определен критерий, по которому можно в любом режиме найти место расположения источников несимметрии относительно ГРБП: со стороны системы, со стороны потребителя или с обеих сторон. Поэтому нет возможности определить, какой из названных режимов наблюдается и в чистом виде использовать математическое описание, приведенное в статье для них. Кроме того, для расчета по приведенным в статье формулам требуется знать величину ЭДС системы, измерение которой также недоступно.

Предположим, что источником несимметрии является нагрузка. В соответствии с имеющимся математическим описанием матрицу симметричных составляющих напряжения на ГРБП можно представить в виде:

$$\bar{U}_s = \bar{S}^{-1} \cdot \bar{Y} \cdot \bar{Z}_h \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ a^2 \\ a \end{pmatrix} \cdot \bar{E}_A. \quad (4)$$

где  $\bar{S}^{-1} = \frac{1}{3} \cdot \begin{pmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$  – матрица обратного перехода Фортескью;

$$\bar{Y} = \begin{pmatrix} \frac{1}{Z_c + Z_{HA}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{Z_c + Z_{HB}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{Z_c + Z_{HC}} \end{pmatrix}; \bar{Z}_H = \begin{pmatrix} Z_{HA} & 0 & 0 \\ 0 & Z_{HB} & 0 \\ 0 & 0 & Z_{HC} \end{pmatrix};$$

$a = e^{j120^\circ}$  – оператор поворота фазы вектора;

$Z_{HA}, Z_{HB}, Z_{HC}$  – фазные сопротивления нагрузки;

$Z_c$  – сопротивление связи с системой.

Из уравнения (4) выведем выражение для расчета напряжения обратной последовательности

$$\underline{U}_2 = \frac{\underline{E}_A}{3} \cdot \left( \frac{Z_{HA}}{Z_c + Z_{HA}} + \frac{Z_{HB}}{Z_c + Z_{HB}} \cdot a + \frac{Z_{HC}}{Z_c + Z_{HC}} \cdot a^2 \right). \quad (5)$$

Напряжение обратной последовательности, полученное по формуле (5), нельзя использовать для расчета  $K_{2U}''$ , так как  $U_2 \neq U_2''$ . Это объясняется наличием ЭДС системы  $\underline{E}_A$ , которая не известна. Более того, при сделанном допущении об источнике несимметрии,  $\underline{E}_A$  является величиной фиктивной, не соответствующей действительному режиму.

Особенностью формулы (5) является то, что многочлен в скобках не зависит от параметров режима системы, а определяется параметрами схемы замещения. В уравнении для расчета напряжения прямой последовательности эта особенность присутствует также:

$$\underline{U}_1 = \frac{\underline{E}_A}{3} \cdot \left( \frac{Z_{HA}}{Z_c + Z_{HA}} + \frac{Z_{HB}}{Z_c + Z_{HB}} + \frac{Z_{HC}}{Z_c + Z_{HC}} \right). \quad (6)$$

Для расчета  $K_{2U}''$  следует отказаться от измерения напряжения прямой последовательности  $U_1$ . Это позволяет исключить из расчетных выражений неизвестные параметры режима и производить расчет по соотношению параметров схемы замещения, что дает возможность использовать расчетную формулу в следующем виде:

$$K_{2U}'' = \frac{U_2''}{U_1} = \frac{\left| \frac{Z_{HA}}{Z_c + Z_{HA}} + \frac{Z_{HB}}{Z_c + Z_{HB}} \cdot a + \frac{Z_{HC}}{Z_c + Z_{HC}} \cdot a^2 \right|}{\left| \frac{Z_{HA}}{Z_c + Z_{HA}} + \frac{Z_{HB}}{Z_c + Z_{HB}} + \frac{Z_{HC}}{Z_c + Z_{HC}} \right|}. \quad (7)$$

Для расчета  $K'_{2U}$  можно воспользоваться признаком нарушения симметрии по обратной последовательности при симметричной нагрузке, согласно которому коэффициенты несимметрии напряжения на ГРПП и ЭДС системы равны ( $K_{2U} = K_{2E}$ ). Так как симметричные составляющие напряжения на ГРПП известны по результатам замеров, то определение симметричных составляющих ЭДС можно произвести по формулам

$$\left. \begin{aligned} \underline{E}_1 &= \underline{U}_1 + \underline{Z}_{c1} \cdot \underline{I}_1; \\ \underline{E}_2 &= \underline{U}_2 + \underline{Z}_{c2} \cdot \underline{I}_2; \end{aligned} \right\},$$

а затем:

$$K'_{2U} = K_{2E} = \frac{E_2}{E_1}. \quad (8)$$

Определить  $K'_{2U}$  можно и другим путем. Для этого надо найти комплексное значение

$$\underline{K}_{2U}'' = \frac{\frac{\underline{Z}_{нА}}{\underline{Z}_c + \underline{Z}_{нА}} + \frac{\underline{Z}_{нВ}}{\underline{Z}_c + \underline{Z}_{нВ}} \cdot a + \frac{\underline{Z}_{нС}}{\underline{Z}_c + \underline{Z}_{нС}} \cdot a^2}{\frac{\underline{Z}_{нА}}{\underline{Z}_c + \underline{Z}_{нА}} + \frac{\underline{Z}_{нВ}}{\underline{Z}_c + \underline{Z}_{нВ}} + \frac{\underline{Z}_{нС}}{\underline{Z}_c + \underline{Z}_{нС}}} \quad (9)$$

и рассчитать комплекс напряжения обратной последовательности  $\underline{U}_2''$ , которое было бы зафиксировано на ГРПП по причине нарушения симметрии только потребителем при симметричной системе:

$$\underline{U}_2'' = \underline{K}_{2U}'' \cdot \underline{U}_1. \quad (10)$$

Затем определяется комплекс напряжения обратной последовательности  $\underline{U}_2'$ , которое было бы зафиксировано на ГРПП по причине нарушения симметрии только в системе при симметричной нагрузке

$$\underline{U}_2' = \underline{U}_2 - \underline{U}_2'' \quad (11)$$

и искомый коэффициент

$$K'_{2U} = \frac{U_2'}{U_1}. \quad (12)$$

В формулах (10), (11) использованы комплексные значения симметричных составляющих напряжения  $\underline{U}_1$  и  $\underline{U}_2$ , замеренные на ГРПП.

#### Выводы.

1. Выведены математические выражения, которые позволяют обеспечить моделирование коэффициентов участия субъектов при нарушении симметрии по обратной последовательности.

2. Целесообразно провести оценку погрешности определения участия, вносимую ошибкой введения сопротивления связи с системой.

## Литература

1. Сендерович Г.А. Определение действительного вклада потребителя в создание несимметрии на сборных шинах. / Вісник Національного технічного університету "Харківський Політехнічний інститут". - Харків: НТУ "ХПІ". - 2004. - №47. - С. 136 - 139.
2. Сендерович Г.А. Анализ влияния потребителей на несимметрию по обратной последовательности в точке общего присоединения / Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2005. – № 1/2 (13). – С. 89 – 94.

МОДЕЛЮВАННЯ КОЕФІЦІЄНТІВ УЧАСТІ  
СУБ'ЄКТІВ У ПОРУШЕННІ СИМЕТРІЇ ЩОДО ЗВОРотної ПОСЛІДОВНОСТІ

П.Г. Щербакова

*Виведено математичні вираження для моделювання коефіцієнтів участі споживача та мережного підприємства у порушенні симетрії щодо зворотної послідовності.*

MODELING OF COEFFICIENTS OF PARTICIPATION OF SUBJECTS AT INFRINGEMENT OF THE SYMMETRY BY RETURN SEQUENCE

P. G. Shcherbakova

*Mathematical expressions for modeling coefficients of participation of the consumer and the network enterprise at infringement of the symmetry by return sequence are deduced.*